

水位、水量、产量联控的华北平原地下水超采区 节水灌溉多目标优化

井 淼¹, 张江江^{2,3}, 刘 瑾¹, 杨思敏¹, 谢一凡^{2,4}, 孙梦雅¹, 鲁春辉^{2,5}

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
5. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为探索地下水位、灌溉水量、作物产量联控下华北平原农作物节水灌溉方案,通过耦合基于 FloPy 的地下水数值模型、作物需水模型和 NSGA-II 多目标优化模型,研发了水位、水量、产量联控的节水灌溉多目标优化模拟框架 irrigmoo。以华北平原中东部的沧州市作为研究区,通过收集实地资料,进行了地下水数值模型校正、作物需水模型构建以及 NSGA-II 多目标优化模型配置,获得了限水灌溉条件下灌溉方案的帕累托非劣解集,并优选了代表性的地下水压采和水源置换方案。结果表明:若将灌溉用水中地下水的比例压减 42.13%,并将 15.28% 的地下水置换为替代水源,可实现深层地下水位回升 2.36 m,灌溉水量减少 26.86%,冬小麦产量下降 3.94%;若禁止开采地下水用于灌溉,且将现状开采量的 37% 置换为替代水源,有望实现深层地下水位回升 8.95 m,灌溉水量减少 62.87%,冬小麦减产 12.70%,且产量仍在约束范围内。

关键词:限水灌溉;地下水超采;地下水位;地下水数值模型;多目标优化;粮食产量;华北平原
中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)02-0184-09

Multi-objective optimization of water-saving irrigation in groundwater over-exploitation area of the North China Plain under joint control of water level, water volume, and crop yield//JING Miao¹, ZHANG Jiangjiang^{2,3}, LIU Jin¹, YANG Simin¹, XIE Yifan^{2,4}, SUN Mengya¹, LU Chunhui^{2,5} (1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To explore water-saving irrigation strategies for crops in the North China Plain under the joint control of groundwater level, irrigation water use, and crop yield, a multi-objective optimization simulation framework for water-saving irrigation, named irrigmoo, was developed. This framework integrates a groundwater numerical model based on FloPy, a crop water requirement model, and the NSGA-II multi-objective optimization model. Using Cangzhou City in the central-eastern part of the North China Plain as the study area, field data were collected to calibrate the groundwater numerical model, construct the crop water requirement model, and configure the NSGA-II multi-objective optimization model. A set of Pareto non-dominated solutions for irrigation schemes under limited water conditions was obtained, and representative groundwater extraction reduction and alternative water source substitution schemes were selected. The results indicate that reducing the proportion of groundwater in irrigation water by 42.13% and replacing 15.28% of groundwater with alternative water sources could lead to a 2.36 m rise in deep groundwater levels, a 26.86% reduction in irrigation water use, and a 3.94% decrease in winter wheat yield. If groundwater extraction for irrigation is completely banned and 37% of the current extraction is replaced with alternative water sources, the deep groundwater level could rise by 8.95 m, irrigation water use could be reduced by 62.87%, and winter wheat yield would be decreased by 12.7%, while still remaining within yield constraints.

Key words: limited water irrigation; groundwater over-exploitation; groundwater level; groundwater numerical model; multi-objective optimization; crop yield; the North China Plain

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200500);国家自然科学基金项目(52109012)
作者简介:井淼(1989—),男,副教授,博士,主要从事地下水数值模拟研究。E-mail:mjing@hhu.edu.cn
通信作者:鲁春辉(1981—),男,教授,博士,主要从事地下水资源与环境研究。E-mail:clu@hhu.edu.cn

华北平原是中国重要的粮食产区,粮食作物播种面积占总耕地面积的 70% 以上^[1],主要种植模式为冬小麦-夏玉米一年两熟制。华北平原的冬小麦生育期与干旱季重合,多年平均缺水 300mm 以上,灌溉用水中地下水的比例超过 70%^[1]。由于华北平原中东部地区浅层地下水多为难以利用的咸水或微咸水,且地表水资源极其有限,故深层地下水在灌溉方面发挥了主要作用,这也令深层地下水位在 2014 年之前在区域尺度上持续下降,形成了面积达 2.38 万 km² 的“天津-沧州-衡水-德州漏斗”^[2],进而引发了地面沉降、海水入侵等一系列严重生态环境地质问题,严重制约了当地社会经济的可持续发展^[3-4]。与此同时,河北省中东部地区是优质冬小麦的重要产区,承担着保障国家粮食安全的重大任务,必须在保证粮食产量的前提下实现超采区深层地下水的水位恢复^[5-6]。

国内外学者以产量、水分利用效率及地下水压采量等作为目标函数,在灌溉制度优化方面开展了大量研究^[7-9]。与此同时,国内学者在华北平原地下水开采时空演变^[10-11]、地下水位演化趋势^[12-13]、替代模型适应性分析^[14]、区域尺度数值模拟等领域^[15-16]开展了大量研究,但大多数研究仅聚焦在地下水量和水位的演变规律,并未同时考虑冬小麦粮食稳产的目标。

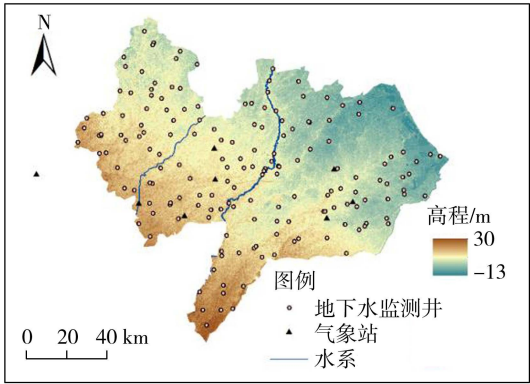
为解决华北平原地下水超采与粮食稳产之间的矛盾,水源置换逐渐成为一项重要途径。水源置换包括水系整治、外调水利用、微咸水淡化等多种方式,应根据当地水资源禀赋采用因地制宜的置换方案。然而,目前华北平原农业灌溉用水的水源置换率仍较低,水源置换在灌溉节水中的潜力巨大^[1]。更重要的是,目前水资源管理要求达到水位、水量、产量联控,即需要统筹地下水位回升、灌溉水量压减和粮食稳产 3 个目标,不可通过牺牲某一目标换取另外两个目标的达成。近年来,限水灌溉^[17]成为实现上述目标的重要手段,并得到关注^[7-9]。如何兼顾 3 个目标的限水灌溉方案,并有效发挥外调水利用、微咸水淡化在农业节水中的潜力,是一个亟待解决的科学问题。

本文针对华北平原地下水超采严重的问题,耦合了基于 FloPy 的区域尺度地下水数值模型、作物需水模型和 NSGA-II 多目标优化模型,提出了区域尺度的作物灌溉方案多目标分区优化模拟框架 irrigmoo,并以典型深层地下水超采区沧州市为研究区,探讨了兼顾冬小麦产量、地下水位及总灌溉水量的节水灌溉方案,提出了区域尺度地下水超采区农

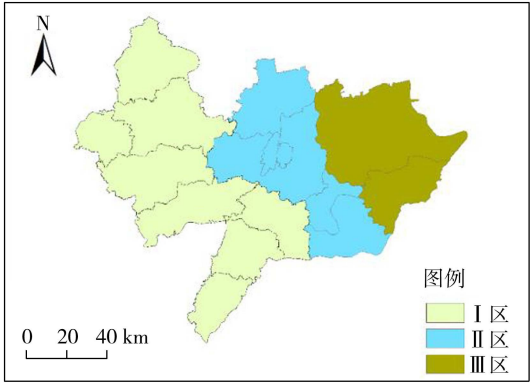
作物灌溉用水多目标优化方法,以期为华北平原中东部地区的水安全与粮食安全保障提供科学支撑。

1 研究区概况

以河北省东南部渤海之滨的沧州市为研究区。沧州市为华北平原深层地下水超采最严重的区域之一,且冬小麦生育期井灌是其超采的主要原因^[1]。沧州市面积 14 056 km²^[16](图 1),属于暖温带的半干旱半湿润季风气候区。根据已有的多源气象数据,降水量年内分配不均,6—9 月多年平均降水量为 436.1 mm,占全年降水量的 79.1%。沧州市所在的黑龙港地区多年平均降水量为 551 mm,多年平均参考作物蒸散量为 955.3 mm,仅在夏玉米生育期的 7 月和 8 月,多年平均降水量高于参考作物蒸散量^[17]。研究区在冬小麦生育期内需水量约为 476.0 mm^[18],作物生育期内的缺水量主要依赖于灌溉。



(a) 研究区范围及高程



(b) 冬小麦灌溉分区

图 1 研究区概况和灌溉分区

Fig. 1 Overview of study area and irrigation zoning

根据文献[1,7]和《沧州统计年鉴(2021)》,沧州市冬小麦的灌溉方案分为 3 个类型区:①高产麦田类型区,一般情况下,地下水能保证浇 3 水(I 区);②中产麦田类型区,地下水能保证浇 1 或 2 水(II 区);③低产麦田类型区,冬小麦用水基本上是“靠天吃饭”(III 区),如图 1 所示。依据文献[1]

中的估算,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区冬小麦的多年平均灌水量约为279、223、68 mm。

2 研究方法

2.1 节水灌溉多目标优化模拟框架

本文采用 FloPy 构建三维地下水数值模型。FloPy 是 MODFLOW 的 Python 程序包,用于创建、运行和后处理 MODFLOW、MT3D、SEAWAT 和其他与 MODFLOW 相关联的地下水程序。FloPy 最大的优点在于脚本化建模,即通过 Python 脚本进行模型的创建、修改、运行和后处理,并借助 pandas、Matplotlib 等 Python 扩展包完成前处理、绘图和数据分析等功能。FloPy 可以读取已建立的地下水数值模型的网格、压力期、时间步长、水文地质参数、边界条件、初始条件、求解算法和输出格式等信息,然后创建一个 Python 对象,将以上所有信息集成在此 Python 对象中。

多目标优化算法选用应用较广的 NSGA-II^[19-20]。NSGA-II 基于快速非支配排序算法,引入了精英策略,扩大了采样空间以防止最佳个体的丢失,并具有较高的运算速度和鲁棒性。

通过耦合基于 FloPy 的地下水数值模型、NSGA-II 多目标优化模型和作物需水模型,提出了节水灌溉多目标优化模拟框架 irrigmoo,如图 2 所示。模拟框架由 3 个模块构成:①基于 FloPy 的地下水数值模型;②作物需水模型;③NSGA-II 多目标

优化模型。irrigmoo 模拟框架适用于任意一种作物灌溉用水的多目标优化,本文考虑的作物为冬小麦。具体的建模步骤如下:

a. 构建基于 FloPy 的地下水数值模型。收集研究区气象、水文、地质、土地利用、土壤质地、地下水开采量、地下水位等资料,采用 FloPy 构建并校正研究区三维地下水数值模型。通过 FloPy 加载校正后的地下水数值模型并读取模型输出的水位,获得研究区平均地下水位变幅与研究区冬小麦分区灌溉方案的函数关系,将此函数关系作为目标函数,保存为 Python 脚本 obj_head.py,以便后期调用。

b. 调研作物种植模式和灌溉方案,在农田试验的基础上,采用 Python 构建作物需水模型。若研究区不同区域的作物灌溉模式不同,则需将研究区进行分区,将分区后的灌溉水量作为决策变量,并将研究区的作物总产量作为目标函数。将此作物需水模型保存为 Python 脚本 obj_cropyield.py,以便后期调用。

c. 设置 NSGA-II 多目标优化模型的相关参数(包括种群大小和优化搜索代数),并初始化决策变量。

d. 调用 obj_head.py 和 obj_cropyield.py,并调用 NSGA-II 进行最优化模型求解。以研究区平均地下水位变幅、农作物总产量和总灌溉水量为优化目标,以研究区灌溉定额及灌溉水源为决策变量,将其写入主程序的 Python 脚本并调用 NSGA-II 进行寻优,最终得到分区灌水量的帕累托非劣解集合。NSGA-II 每一个迭代步都需要调用一次 FloPy,并更新地下水数值模型的参数,实现了 FloPy 和 NSGA-II 无缝链接和紧密耦合。

2.2 地下水数值模型构建

收集了沧州市 127 个钻孔的资料,结合 4 个不同方向的华北平原地质剖面图,构建了沧州市三维含水层地质分层模型。参考牛欣怡等^[14,16]的研究,沧州市含水层在垂向被概化为 3 个含水层,第 1 层为潜水含水层组,也被认为是浅层含水层,第 2、3 层为深部承压含水层。由于含水层中黏土透镜体数量多、分布不规则、空间上不连续,因此不单独划分弱透水层,而是将黏土透镜体与含水层视为一个整体。在三维地质分层模型的基础上构建了有限差分网格,将研究区在水平向以 1 000 m×1 000 m、垂向以 10 m 进行了空间离散。整个研究区的有限差分网格包含 26 268 个单元。由于收集的降水量、地下水开采量及地下水位数据时间尺度不一,选择有效数据重合的时间范围(2009 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日)为模

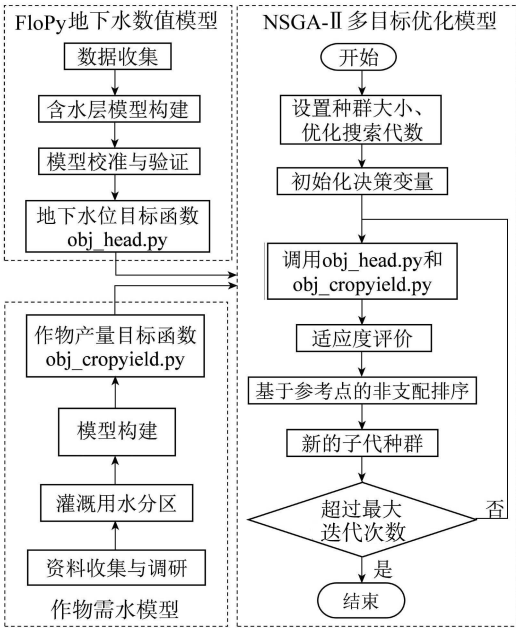


图 2 节水灌溉多目标优化模拟框架 irrigmoo

Fig. 2 Multi-objective optimization simulation framework irrigmoo of water-saving irrigation

型模拟期,故模型模拟期时长为 12 a。

沧州市的西部和北部接受山区侧向补给,地下水位相对较高,此区域的潜水含水层被处理为定水头边界。研究区东部与渤海相连,此区域的潜水含水层被处理为通用水头边界,即第三类边界。研究区南部的地下水位较低,且与相邻含水层有水力交换,此区域的潜水含水层被处理为通用水头边界。下伏的其他层位的侧向边界设定为隔水边界。

在垂向上,潜水含水层自由水面为系统的上边界。通过该边界,潜水接受外界的补给,补给源包括大气降水入渗、渠灌补给和井灌回归等。大气降水入渗量通过入渗系数法确定,其中降雨和气温由沧州市气象站的监测数据插值得到。渠灌补给系数和井灌回归补给系数根据文献[14,16]确定,并以面状数据的形式带入模型中进行计算。参考代志雪^[16]的研究,将垂向渗透系数设置为横向的 1/1 000,从而保证地下水的主流向为水平向。潜水含水层渗透系数、给水度、降水入渗补给系数、田间灌溉入渗补给系数、井灌回归补给系数分别为 5~80 m/d、0.03~0.23、0.13、0.13、0.15。第 2、3 层含水层下伏岩层大多为第三系碎屑岩类,处理为隔水边界。地下水开采量包括了农业、工业和生活开采量,将每个区县的地下水开采量以点状数据的形式赋值到研究区。值得注意的是,地下水开采量具有空间变异性和季节性,因此需通过 FloPy 中的 wel.stress_period_data 对象进行地下水开采量的赋值。渗透系数的空间分布在抽水试验结果的基础上进行参数反演和克里金插值得到。根据曹国亮^[21]的调研成果,沧州市的给水度从黏土层的 0.03 增大到卵砾石的 0.23;深层含水层的渗透系数取值范围为 0.1~60 m/d,储水系数取均一值 4.0×10^{-5} 。

2.3 冬小麦需水模型构建

冬小麦产量的预测具有很大的不确定性,受气温、降水、灌溉方式、土壤质地等影响,田间试验结果存在较大差异。大量冬小麦农田耗水试验^[22-23]表明,冬小麦的产量与耗水量之间呈二次函数关系。丁蓓蓓等^[22]基于 47 篇文献中京津以南河北平原 551 组农田试验观测数据,研究了限水灌溉对冬小麦产量的影响,本文基于 551 组冬小麦产量观测数据,采用二次函数拟合了冬小麦产量变化率和限水灌溉条件下灌溉定额之间的关系,拟合结果如图 3 所示,并以此构建了限水灌溉条件下灌溉定额对冬小麦产量影响的作物需水模型。

对于下限产量、平均产量、上限产量场景,冬小麦产量变化率与灌溉定额之间的关系为

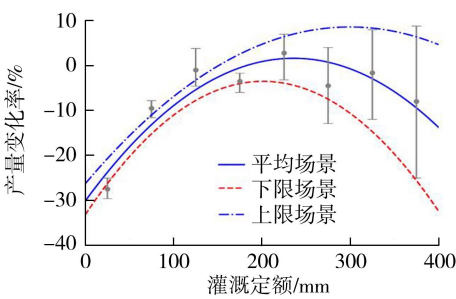


图 3 灌溉定额与冬小麦产量变化率拟合结果

Fig. 3 Fitting results of relationship between irrigation quota and rate of yield change of winter wheat

$$\Delta R = \begin{cases} -7.327 \times 10^{-6} I^2 + 0.002946 I - 0.3316 & (R^2 = 0.882) \quad \text{下限产量} \\ -5.705 \times 10^{-6} I^2 + 0.002691 I - 0.3011 & (R^2 = 0.854) \quad \text{平均产量} \\ -3.883 \times 10^{-6} I^2 + 0.002327 I - 0.2627 & (R^2 = 0.866) \quad \text{上限产量} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ΔR 为冬小麦产量变化率; I 为灌溉定额。

本文采用平均产量场景作为默认场景。根据灌溉条件将沧州市冬小麦灌溉分为 3 个类型区(图 1),通过各县(市)的公开数据和文献[1,7]中的数据,得到模拟期内 I、II、III 区冬小麦全生育期年均需水量分别为 5.00 亿、2.26 亿、1.34 亿 m^3 。根据已有资料^[16],估算深层地下水供水量占沧州市冬小麦生育期灌水量的 24%,因此估算得出 I、II、III 区冬小麦灌溉用地下水开采量分别为 1.200 亿、0.543 亿、0.322 亿 m^3 。

2.4 NSGA-II 多目标优化模型构建

2.4.1 目标函数设定

多目标优化基于 2009—2020 年沧州市气候条件、种植结构和地下水开采模式,设置 2 个决策变量,分别为地下水压采率 r_g 和地下水置换率 r_s :

$$r_g = (I_g^* - I_g) / I_g^* \quad (2)$$

$$r_s = I_s / I_g^* \quad (3)$$

式中: I_g 为目标灌溉制度中取自地下水的水量; I_g^* 为现状灌溉制度中取自地下水的水量; I_s 为替代水源置换量。

多目标优化模型中的优化目标之间往往存在竞争关系,需要考虑冲突目标下的决策。据此设置优化目标为:在最低冬小麦产量和最大深层地下水位降深约束条件下,实现决策主体(当地农业部门和水利部门)的目标,即冬小麦总产量最高、平均地下水位跌幅最小和冬小麦灌溉用水总量最小。

a. 作物产量目标可表示为

$$\max Z_1 = \sum_{i=1}^3 f(r_g, r_s) A_i \quad (4)$$

式中: Z_1 为研究区冬小麦的总产量变幅; A_i 为第 i 区冬小麦的种植面积; $f(\cdot)$ 为描述冬小麦产量与生育期灌水量的函数关系,由式(1)确定。

b. 地下水位目标可表示为

$$\max Z_2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (h_{En} - h_{Sn}) \tag{5}$$

式中: Z_2 为模拟期内目标含水层平均地下水位的变幅; N 为目标含水层的网格总数; h_{Sn} 、 h_{En} 分别为模拟期开始和结束时网格 n 的地下水位。

c. 灌溉节水目标可表示为

$$\min Z_3 = r_s - r_g \tag{6}$$

式中 Z_3 为灌溉水量的变幅。

由此可见,目标优化即为寻找满足上述目标的地下水压采率和地下水置换率的帕累托非劣解集。

2.4.2 约束条件设定

设定地下水位、灌溉定额、冬小麦总产量和水源置换 4 个约束条件。

地下水位约束条件为

$$\frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} (h_{En} - h_{Sn}) > \Delta h_{\min} \quad (i = 1, 2, 3) \tag{7}$$

式中: N_i 为第 i 区目标含水层总网格数; $\Delta h_{\min}$ 为模拟期内地下水位总降幅阈值。地下水位年平均降幅阈值应小于历史均值,根据《2020 年河北省水资源公报》、文献[2]和已有的地下水监测资料,计算得到模拟期内研究区地下水位年平均变幅约为-0.55 m,故设 $\Delta h_{\min} = -6.57$ m。

根据当地水资源禀赋,设定沧州市冬小麦灌溉定额约束条件为

$$I_{\max i} < I_i < I_{\min i} \quad (i = 1, 2, 3) \tag{8}$$

式中: I_i 为第 i 区冬小麦灌溉定额; $I_{\max i}$ 、 $I_{\min i}$ 分别为第 i 区冬小麦灌溉定额上限和下限。将灌溉定额的下限设为 0。沧州中西部地区(Ⅰ、Ⅱ区)地下水资源禀赋较好,参照《2020 年河北省水资源公报》《沧州统计年鉴(2021)》和南皮试验站灌溉试验^[23],将Ⅰ、Ⅱ区灌溉定额上限分别设为 340、250 mm,将地

下水禀赋较差的Ⅲ区灌溉定额上限设为 120 mm。

沧州市所处华北平原肩负着保障国家粮食安全的重任,沧州市冬小麦总产量约束条件为

$$R > R_{\min} \tag{9}$$

式中 R 、 $R_{\min}$ 分别为沧州市冬小麦总产量和总产量的最小值。

根据《沧州统计年鉴(2021)》统计数据,满足沧州市小麦完全自给的冬小麦总产量约为 68.3 万 t。沧州市冬小麦总产量为 188.9 万 t,因此满足沧州市粮食完全自给的产量占当年实际总产量的 36.2%。河北省为产销平衡区,肩负着国家冬小麦供应的重任,因此,在满足冬小麦自给的基础上,将自给率翻倍,作为冬小麦总产量的下限,得到 $R_{\min} = 136.8$ 万 t。

水源置换受到置换水源量的制约,存在置换率的上限。根据河北省水利厅发布的数据^[1-2],沧州市持续实施地下水超采综合治理,2023 年开展农业灌溉水源置换、河道清理整治等项目 12 个,并通过“1+10”工程、江水村村通工程、《河北省海水淡化利用发展行动实施方案(2021—2025 年)》等,将压减地下水超采量 3166 万 m³。根据沧州市地下水开采利用现状和未来水源置换工程规划^[24],将灌溉用地地下水置换率上限设为 49.3%。

3 结果与分析

3.1 地下水数值模型校正

地下水数值模型的校正分为两步:①以渗透系数为校正变量,校正稳态地下水数值模型,以重现模拟期内地下水位的长时平均值;②以给水度和储水系数为校正变量,校正非稳态地下水数值模型,以重现地下水位的长时演化动态。

稳态地下水数值模型水位模拟结果如图 4 所示。校正后稳态地下水数值模型的均方根误差(RMSE)为 4.69 m,说明校正后稳态地下水数值模型可以较准确地刻画地下水位的空间分布。如图 4(b)所示,沧州市中心区出现了明显的漏斗区,

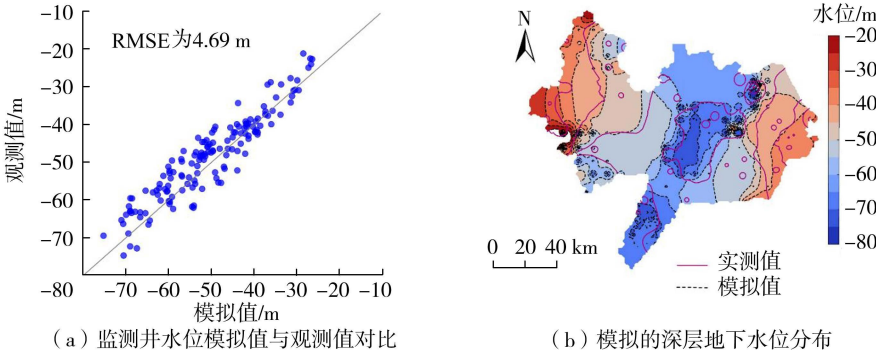


图 4 稳态地下水数值模型水位模拟结果

Fig. 4 Results of groundwater level simulation by steady-state groundwater numerical model

漏斗中心区的深层地下水位埋深可达 80 m,且南部吴桥县的深层地下水位较低。通过与实测地下水位等值线的对比发现,模拟结果与实测数据基本相符^[2],证明了稳态地下水数值模型可以较好地模拟沧州市地下水流场。根据数值模型计算结果,在 $k_h/k_v=10$ (k_h 、 k_v 分别为水平向和垂向渗透系数)的情况下,越流补给占深部承压含水层总补给量的 81.7%,其余 18.3%为侧向补给。模型的地下水均衡计算结果与门宝辉等^[12,14]研究结果基本相符,表明稳态地下水数值模型可以准确地反映区域地下水均衡状况。

为量化自然和人工双重作用下深层地下水资源的演变趋势,需要构建非稳态地下水数值模型。经过手动率定,确定含水层的给水度为 0.1,储水系数为 4.0×10^{-5} 。利用纳什效率系数(NSE)定量判断数值模型的精确度。由图 5 可以看出,校正后的非稳态地下水数值模型可以较好地重现研究区地下水位的历史变化趋势。模拟期内沧州市地下水位空间变异性较强,其中监测井 6、8、12 的地下水位在

2015 年后呈上升趋势,而监测井 4 的地下水位在 2015 年后保持平稳。综上,校正后的非稳态地下水数值模型可重现研究区地下水位历史演变趋势,模型可用来进行地下水开采量的最优化分析。

3.2 节水灌溉方案多目标优化

本文共设置 3 种产量场景,在每种产量场景中,NSGA-II 种群大小设置为 100,因此每种场景下共有 100 组帕累托非劣解,形成了包含产量变幅、地下水位变幅和灌溉水量变幅的帕累托边界,其中包含倾向于不同目标的多个方案。

图 6 为平均产量场景下的优化结果。从图 6(a)可以看出,对于平均产量场景,优化后的地下水压采率为 5.33%~100%,地下水置换率为 0~44.53%,而地下水位平均变幅为-3.59~8.06 m。这说明通过地下水压采和灌溉水源置换的耦合作用,可达到深层地下水止跌回升的效果。从图 6(b)可以看出,在地下水压采和灌溉水源置换的双重作用下,冬小麦的产量因灌溉定额的压减而略微下降,变幅为-17.40%~-2.48%,但总体上达到了冬小麦

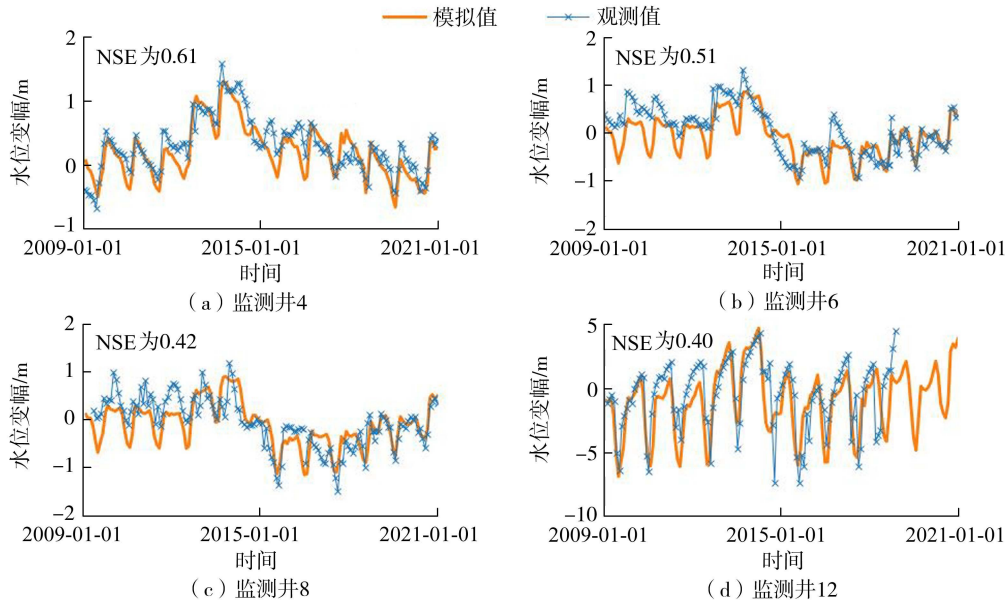


图 5 非稳态地下水数值模型模拟结果与观测值的对比

Fig. 5 Comparison between simulated and observed groundwater levels of transient groundwater numerical model

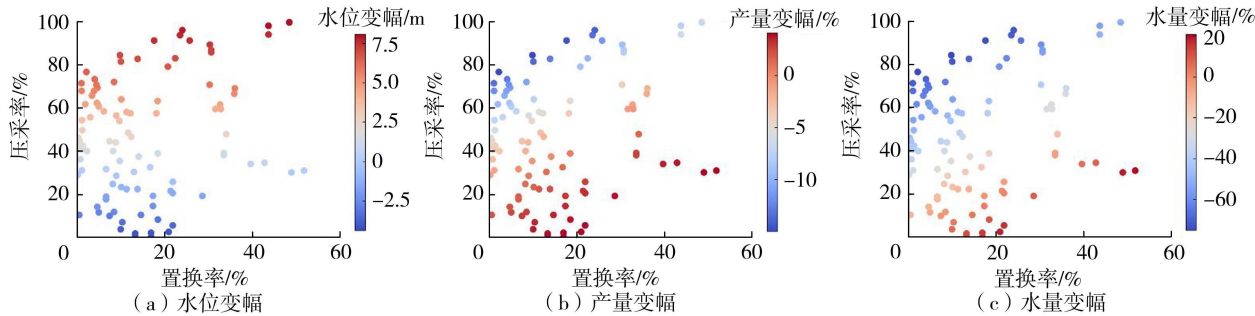


图 6 平均产量场景下的优化结果

Fig. 6 Optimization results under median yield scenario

稳产的要求。值得注意的是,灌溉水源置换有助于保证冬小麦产量。从图 6(c)可以看出,采用地下水压采和置换双重措施后,冬小麦总灌溉水量得到压减,比现状灌溉制度降低了 4.63%~75.00%。图 6 中的散点大多数集中在左上半部,说明地下水压采比水源置换的权重更高,因而,地下水压采是实现地下水位恢复、冬小麦稳产和灌溉节水的首要方案,而灌溉水源置换是保证冬小麦稳产的有效方案。

图 7 为不同产量场景下的目标函数优化结果,即 3 种场景下的帕累托前沿。不同场景下帕累托前沿形状不同,三者都对于水位变幅和产量变幅高度离散。说明地下水位和冬小麦产量受到地下水压采率和置换率的强烈控制,不同的压采率和置换率组合会对地下水位和冬小麦产量产生重大影响。综合图 6 和图 7 可知,这个影响机制在于更高的置换率会大大提高冬小麦产量,并有助于地下水位止跌回

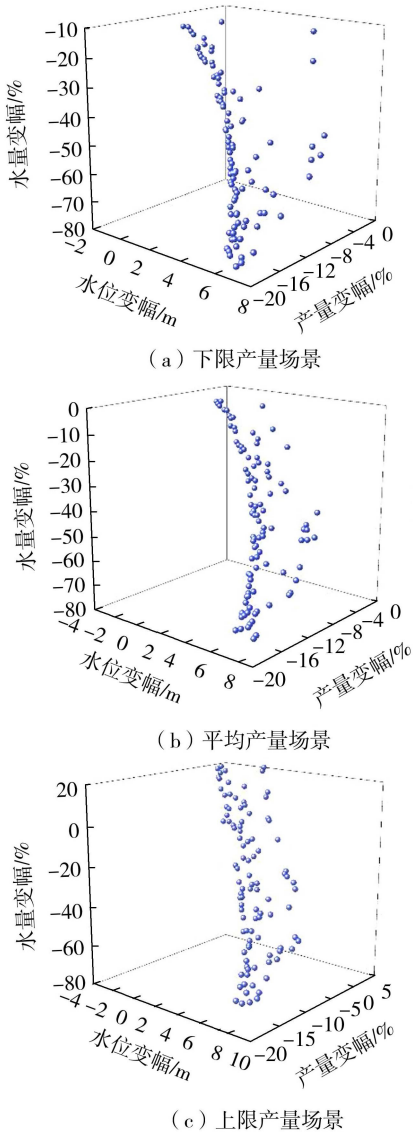


图 7 3 种产量场景下的帕累托前沿

Fig.7 Pareto fronts for three yield scenarios

升。相对于地下水位和冬小麦产量,灌溉水量与压采率和置换率的关系较简单,也即压采率和置换率与灌溉水量呈负相关。对比 3 种产量场景的结果发现,仅在上限产量场景下,才有望在灌溉节水和地下水位回升的同时,实现冬小麦增产(增产幅度为 0~4.08%)。表明冬小麦产量受到气象和灌溉方式等多重影响,具有较大的不确定性。

在平均产量场景下,从 100 组帕累托非劣解集合中选取了具有代表性的水位优先方案、产量优先方案、水量优先方案和平衡方案,如表 1 所示。水位优先方案的地下水压采率和置换率分别为 100%和 37.13%,即完全禁采地下水。相对于模拟期初始状态,此方案可实现总灌溉水量减少 62.87%,平均地下水位上升 8.95 m,但冬小麦减产 12.70%。与之相反,产量优先方案使总灌溉水量减少 4.98%,平均地下水位下降 4.22 m,冬小麦减产 2.48%。平衡方案则是兼顾了水位目标、产量目标和水量目标的方案,有望使总灌溉水量减少 26.86%,平均地下水位上升 2.36 m,冬小麦总产量减少 3.94%。比较 4 种代表性节水灌溉方案,不难发现在地下水位、灌溉水量、作物产量 3 目标联控下,通过耦合地下水压采和水源置换,4 种方案均能实现灌溉节水,节水幅度为 4.98%~74.99%,仅在产量优先方案下深层地下水位出现下降。而在 4 种方案中,冬小麦产量会出现不同程度的下降,但是下降幅度在产量约束范围内(不大于 17.48%),仍可满足冬小麦稳产的要求。

表 1 4 种灌溉方案下水位、产量和水量变幅

Table 1 Variations of water level, crop yield, water volume under four optimized irrigation schemes

方案	地下水压 采率/%	地下水置 换率/%	水位变 幅/m	产量变 幅/%	水量变 幅/%
水位优先方案	100	37.13	8.95	-12.70	-62.87
产量优先方案	8.20	3.22	-4.22	-2.48	-4.98
水量优先方案	96.11	21.12	10.38	-17.48	-74.99
平衡方案	42.13	15.28	2.36	-3.94	-26.86

3.3 讨论

以往的农业节水研究往往采用灌溉水量和冬小麦产量作为冲突目标。本文在灌溉水量和冬小麦产量两个目标之外,通过耦合三维地下水数值模型,将地下水位目标引入多目标优化框架,实现了水位、水量、产量 3 目标联控下的节水灌溉方案优化。优化后的灌溉方案为在预设的约束条件下满足 3 个冲突目标的帕累托非劣解。更重要的是,本文发现冬小麦稳产和地下水位回升并非完全对立的目标。水源置换为同时实现冬小麦稳产、灌溉节水和地下水位回升提供了可能性,需要引起更多的重视。

目前,河北省正大力实施地下水超采综合治理,

取得了显著成效^[25]。通过“持续引水抓开源、农业节水促增效、引蓄并举多补水”等措施,于2022年累计压减地下水超采量51.6亿m³,实现了城镇地下水位全面回升^[26]。而通过引水工程、河道清淤、旱作雨养、水系整治等措施,新增蓄水能力4300万m³,为本文的水源置换方案提供了现实基础^[26]。本文的研究为统筹引水开源、农业节水、粮食稳产和引蓄并举等措施提供了科学依据,提出的水位优先、产量优先、水量优先和平衡方案可供相关部门参考。本文仅聚焦于灌溉用水方案的多目标优化,对于具体置换水源的选择,仍需根据当地的水资源禀赋、经济社会发展现状和超采治理目标等进行统筹考虑,例如:对于沧州市西部地区,长江水、黄河水及水库水是可行的替代水源;而对于东部滨海地区,微咸水淡化的优先级更高。

4 结 论

a. 节水灌溉多目标优化框架 irrigmoo 适用于地下水超采区的作物灌溉方案优化,通过将三维地下水数值模型脚本化,实现了水位、产量和水量3目标联控的多目标优化。该框架有效解决了传统研究中灌溉优化模型与地下水数值模型相互独立导致的系统割裂问题,显著提升了地下水-作物-灌溉系统的整体调控精度。

b. 采用 irrigmoo 框架,以地下水压采率和置换率为优化变量,提出了沧州市冬小麦灌溉节水多目标优化方案,获得了3种场景下冬小麦灌溉方案的非劣解集合,并优选了水位优先方案、产量优先方案、水量优先方案和平衡方案。代表性平衡方案可使总灌溉水量减少26.86%,平均地下水位上升2.36m,冬小麦总产量减少3.94%。地下水压采是实现灌溉节水的基本方案,而水源置换是解决地下水位止跌回升和冬小麦稳产二者矛盾的必要措施。需要结合地下水压采和水源置换,才能同时实现华北平原地下水采补平衡、灌溉节水和冬小麦稳产的目标。

参考文献:

[1] 任理,李佩. 华北平原在限水和咸水灌溉及喷灌情景下作物水分生产力的模拟与深层地下水压采量的估算:以河北省黑龙港地区为例[M]. 北京:科学出版社,2021.

[2] 杨会峰,曹文庚,支传顺,等. 近40年来华北平原地下水位演变研究及其超采治理建议[J]. 中国地质,2021,48(4):1142-1155. (YANG Huifeng, CAO Wengeng, ZHI Chuanshun, et al. Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on its overexploitation treatment[J]. Geology in China, 2021,

48(4):1142-1155. (in Chinese))

[3] 马青山,骆祖江. 沧州市地下水开采-地面沉降数值模拟[J]. 水资源保护,2015,31(4):20-26. (MA Qingshan, LUO Zuijiang. Numerical simulation of groundwater exploitation and land subsidence in Cangzhou City[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(4):20-26. (in Chinese))

[4] 石建省,李国敏,梁杏,等. 华北平原地下水演变机制与调控[J]. 地球学报,2014,35(5):527-534. (SHI Jiansheng, LI Guomin, LIANG Xing, et al. Evolution mechanism and control of groundwater in the North China Plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(5):527-534. (in Chinese))

[5] 闫宗正,房琴,路杨,等. 河北省地下水压采政策下水价机制调控冬小麦灌水量研究[J]. 灌溉排水学报,2018,37(8):91-97. (YAN Zongzheng, FANG Qin, LU Yang, et al. Changing water price to regulate groundwater extraction for irrigating winter wheat in North China Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(8):91-97. (in Chinese))

[6] 沈彦俊,齐永青,罗建美,等. 地理学视角的农业节水理论框架与水资源可持续利用[J]. 地理学报,2023,78(7):1718-1730. (SHEN Yanjun, QI Yongqing, LUO Jianmei, et al. The combined pathway to sustainable agricultural water saving and water resources management: an integrated geographical perspective [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7):1718-1730. (in Chinese))

[7] LI Pei, REN Li. Evaluating the effects of limited irrigation on crop water productivity and reducing deep groundwater exploitation in the North China Plain using an agro-hydrological model: I. parameter sensitivity analysis, calibration and model validation [J]. Journal of Hydrology, 2019, 574:497-516.

[8] LI Pei, REN Li. Evaluating the effects of limited irrigation on crop water productivity and reducing deep groundwater exploitation in the North China Plain using an agro-hydrological model: II. scenario simulation and analysis [J]. Journal of Hydrology, 2019, 574:715-732.

[9] 宋健,李江,杨奇鹤,等. 基于 AquaCrop 和 NSGA-II 的灌溉制度多目标优化及其应用[J]. 水利学报,2018,49(10):1284-1295. (SONG Jian, LI Jiang, YANG Qihe, et al. Multi-objective optimization and its application on irrigation scheduling based on AquaCrop and NSGA-II [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(10):1284-1295. (in Chinese))

[10] 徐腾,王以鹏,叶逾,等. 地下水超采管控体系及水量水位双控体系研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(4):27-35. (XU Teng, WANG Yipeng, YE Yu, et al. Research progress on groundwater overexploitation control system and dual control system of water quantity and water level

[J]. Water Resources Protection,2024,40(4):27-35. (in Chinese))

[11] 徐丽丽,束龙仓,李伟,等. 2000—2020 年中国地下水开采时空演变特征[J]. 水资源保护,2023,39(4):79-85. (XU Lili, SHU Longcang, LI Wei, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of groundwater mining in China from 2000 to 2020 [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):79-85. (in Chinese))

[12] 门宝辉,李晨,尹世洋. 基于减法集对势的大兴区地下水开采强度评价与诊断[J]. 水资源保护,2022,38(5):17-25. (MEN Baohui, LI Chen, YIN Shiyang. Evaluation and diagnosis of groundwater exploitation intensity in Daxing District based on subtraction set pair potential[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):17-25. (in Chinese))

[13] 张婧,马贵宏,高雅,等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):21-28. (ZHANG Jing, MA Guihong, GAO Ya, et al. Analysis on influencing factors of groundwater level change in typical well irrigation area in piedmont plain of North China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):21-28. (in Chinese))

[14] 牛欣怡,鲁程鹏,卢佳赟,等. 机器学习模型在地下水埋深模拟中的适应性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):74-82. (NIU Xinyi, LU Chengpeng, LU Jiayun, et al. Adaptability analysis of machine learning model in groundwater depth simulation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):74-82. (in Chinese))

[15] ZHANG Chong, DUAN Qingyun, YEH P J F, et al. Sub-regional groundwater storage recovery in North China Plain after the South-to-North water diversion project [J]. Journal of Hydrology,2021,597:126156.

[16] 代志雪. 沧州市地下水数值模拟研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021.

[17] 王慧军. 河北省粮食综合生产能力研究[M]. 石家庄:河北科学技术出版社,2010.

[18] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京:中国农业科技出版社,1993.

[19] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.

[20] BLANK J, DEB K. Pymoo: multi-objective optimization in Python[J]. IEEE Access,2020,8:89497-89509.

[21] 曹国亮. 华北平原地下水系统变化规律研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2013.

[22] 丁蓓蓓,张雪靓,赵振庭,等. 华北平原限水灌溉条件下冬小麦产量及水分利用效率变化的 Meta 分析[J]. 灌溉排水学报,2021,40(12):7-17. (DING Beibei, ZHANG Xueliang, ZHAO Zhenting, et al. Change in winter wheat yield and its water use efficiency as affected by limited irrigation in North China Plain: a Meta-analysis [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2021,40(12):7-17. (in Chinese))

[23] 巨龙,王全九,王琳芳,等. 灌水量对半干旱区土壤盐分布特征及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(1):86-90. (JU Long, WANG Quanjiu, WANG Linfang, et al. Effects of irrigation amounts on yield of winter wheat and distribution characteristics of soil water-salt in semi-arid region [J]. Transactions of the CSAE,2007,23(1):86-90. (in Chinese))

[24] 沧州市水务局. 沧州市水务局坚持综合施策确保完成年度压采任务[EB/OL]. (2022-11-22) [2024-06-01]. <http://slt.hebei.gov.cn/a/2023/11/22/01039099F715499F8B01ABC8ABBD1471.html>.

[25] 沧州市水务局. 沧州去年压减地下水超采量 3190 万立方米[EB/OL]. (2024-01-04) [2024-06-01]. <http://slt.hebei.gov.cn/a/2024/01/04/FED20618EE23489E95FFA03F10751EED.html>.

[26] 冯战洪,苏建平. 多措并举推进河北地下水超采治理[J]. 中国水利,2022(6):15-16. (FENG Zhanhong, SU Jianping. Control of groundwater over-exploitation in Hebei with multiple measures[J]. China Water Resources,2022(6):15-16. (in Chinese))

(收稿日期:2024-06-03 编辑:施业)

(上接第 172 页)

[17] GRIMALDI S, SERINALDI F. Asymmetric copula in multivariate flood frequency analysis [J]. Advances in Water Resources,2006,29(8):1155-1167.

[18] LU Qingwen, ZHONG Ping'an, XU Bin, et al. Multi-objective risk analysis for flood control operation of a complex reservoir system under multiple time-space correlated uncertainties[J]. Journal of Hydrology,2022,606:127419.

[19] LEE T, SALAS J D. Copula-based stochastic simulation of hydrological data applied to Nile River flows [J]. Hydrology Research,2011,42(4):318-330.

[20] 高月娇,黄生志,聂明秋,等. 引汉济渭工程水源区与受水区的丰枯遭遇及动态变化[J]. 自然灾害学报,2022,31(6):162-173. (GAO Yuejiao, HUANG Shengzhi, NIE Mingqiu, et al. Wetness-dryness encounters and dynamic changes in water source and demand areas of Hanjiang to Weihe River Project [J]. Journal of Natural Disasters,2022,31(6):162-173. (in Chinese))

(收稿日期:2024-08-20 编辑:施业)